

用于供电的柔性负荷调控系统

李慧 潘博源 杨保红 吴占领 张银萍

国网伊犁伊河供电有限责任公司 新疆 伊犁 835000

【摘要】针对冬季电网因电采暖负荷激增导致的重载/过载问题,以及传统调控手段存在的效率低、精准度不足、用户体验差等缺陷,本研究设计了一种用于供电的柔性负荷调控系统。该系统集成组织协调、材料工具管理、设备摸排、调控设备安装、数据采集传输、远程监控调度、安全防护、调控效果评估、负荷调控执行及配置管理十大核心模块,通过分层设计与智能协同,实现对分散式电采暖设备的高效聚合与精准调控。系统引入边缘计算、加密传输、差异化调控等技术,构建“摸排-安装-调控-评估-优化”的闭环流程,有效缓解冬季电网压力,同时保障用户采暖舒适度。实验与应用表明,该系统可显著降低台区重过载天数与负荷峰值,提升用户接受度,为电网冬季安全稳定运行提供有力支撑。

【关键词】柔性负荷调控;电采暖设备;边缘计算;电网重载缓解;差异化调控

DOI:10.12417/2811-0536.26.01.088

1 引言

1.1 研究背景

随着清洁能源替代与居民采暖电气化进程加快,冬季电采暖负荷占比逐年攀升,导致部分电网台区频繁出现重载/过载现象,严重威胁电网安全运行。传统负荷调控手段存在诸多局限:其一,负荷摸排依赖人工操作,缺乏系统的数据筛选与核验机制,易因数据误差导致调控潜力误判;其二,设备安装无标准化质量检测流程,接线虚接、通讯中断等隐患频发,后期运维成本高;其三,数据处理依赖云端集中计算,传输与响应延迟较高,无法满足实时调控需求,且数据安全防护不足;其四,调控策略采用“一刀切”模式,未考虑用户类型差异,易影响采暖舒适度,用户接受度低;其五,缺乏完善的效果评估体系与应急处置机制,难以实现持续优化与风险快速响应。

1.2 研究意义

设计并实现一种高效、精准、安全的柔性负荷调控系统,对解决冬季电网重载问题具有重要现实意义。该系统通过整合智能摸排、边缘计算、差异化调控等技术,可提升分散式电采暖设备的聚合能力,实现“本地组网、就地调节”,在保障电网安全的同时兼顾用户体验,推动负荷调控从“被动应对”向“主动精准”转变,为新型电力系统下的负荷管理提供技术参考。

1.3 研究内容与技术路线

本文详细阐述柔性负荷调控系统的模块设计、功能实现及运行流程,重点分析设备摸排、数据采集传

输、负荷调控执行及安全防护四大核心模块的技术细节。系统采用“前期准备一台区摸排—设备安装—系统配置—负荷调控—效果评估”的技术路线,通过闭环优化机制持续提升调控性能,具体流程如图1所示。

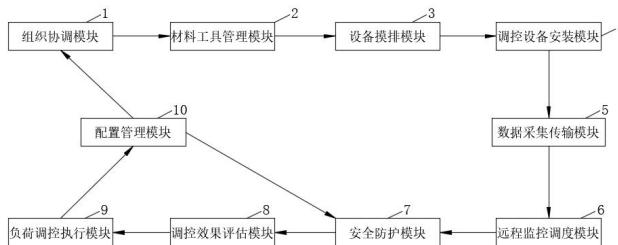


图1 设备摸排模块原理图

2 用于供电的柔性负荷调控系统系统设计

2.1 系统架构

柔性负荷调控系统采用分层架构设计,自上而下分为感知层、传输层、处理层与应用层,各层通过模块协同实现负荷调控全流程管理。

感知层: 由调控设备安装模块中的主机与从机构成,主机部署于台区环网柜,采集变压器运行数据;从机串联于用户电表与断路器之间,采集单户电采暖负荷、电量及三相用电数据,实现“台区—用户”两级数据感知。

传输层: 依托数据采集传输模块,支持有线与LORA无线双模式数据传输,采用加密算法保障数据完整性与安全性,实现感知层与处理层的可靠通信。

处理层: 整合边缘计算处理单元与远程监控调度

模块，边缘端就地分析数据并生成初步调控指令，云端实现全局监控与调度，兼顾实时性与全局协同性。

应用层：涵盖负荷调控执行、调控效果评估、安全防护及配置管理模块，提供差异化调控、效果分析、风险预警及系统维护等功能，满足电网运维与用户管理需求。

2.2 模块组成与连接关系

系统包含十大功能模块，各模块通过数据交互与逻辑关联形成有机整体，具体连接关系如下：

(1) 组织协调模块与材料工具管理模块连接，负责项目组织分工与施工资源筹备。

(2) 材料工具管理模块与设备摸排模块连接，保障摸排阶段的工具与材料供应。

(3) 设备摸排模块与调控设备安装模块连接，为设备安装提供精准的台区与用户数据。

(4) 调控设备安装模块与数据采集传输模块连接，安装完成后启动数据采集功能。

(5) 数据采集传输模块与远程监控调度模块连接，实现数据上传与远程监控。

(6) 远程监控调度模块与安全防护模块连接，实时监测系统运行风险。

(7) 安全防护模块与调控效果评估模块连接，为效果评估提供安全运行数据。

(8) 调控效果评估模块与负荷调控执行模块连接，基于评估结果优化调控策略。

(9) 负荷调控执行模块与配置管理模块连接，实现调控参数的动态配置。

(10) 配置管理模块与安全防护模块连接，保障系统参数维护过程中的安全性。

3 用于供电的柔性负荷调控系统功能设计

3.1 设备摸排模块

设备摸排模块是系统精准调控的基础，通过“初筛—采集—核验”三级流程筛选目标台区，具体包含三个单元：

台区初筛单元：依据台区重过载天数、电采暖用户规模、电采暖负荷占比三项核心指标，建立多维度筛选模型，从电网重过载台区中自动筛选调控潜力较高的目标台区，缩小现场勘查范围，减少盲目作业。例如，对某地区 100 个重载台区筛选后，仅保留电采暖负荷占比超 30%且用户规模超 50 户的 20 个台区进入下一环节。

现场数据采集单元：联合台区经理开展入户调研，采集台区基础信息（变压器容量、线路参数）与用户信息（电采暖设备功率、使用时段、用户类型），并采用“断相法”精准判断三相负荷分配情况。“断相法”通过临时断开某一相电源，监测剩余两相的电流变化，计算三相负荷不平衡度，为后续设备安装与调控策略制定提供数据支撑。

智能数据核验单元：通过机器学习算法比对台区初筛数据与现场采集数据，自动校验数据一致性（如用户规模、负荷占比误差需 $\leq 5\%$ ），生成核验报告。对数据不一致的台区（如初筛显示用户规模 60 户，现场采集仅 50 户），标记异常原因并辅助工作人员二次核查，最终确认 18 个符合要求的实施台区。

3.2 调控设备安装模块

调控设备安装模块采用“主机-从机”分布式部署方案，确保数据采集与负荷控制的全面性，包含三个单元：

主机安装单元：根据变压器安装方式（户外柱上式、户内环网式），将主机固定于环网柜内，通过专用电缆接入变压器出线侧与互感器，实现台区总电流、电压、功率因数等运行数据的实时采集，采样频率设为 1 次/秒，满足负荷监测的实时性需求。

从机安装单元：依据用户表箱类型（单相表箱、三相表箱），将从机串联于电表与断路器之间，按“左零右火”规范接入三相电源与零线。从机支持远程控制功能，可通过调整电采暖设备档位（如高档、中档、低档）实现单户负荷调节，调节精度 $\pm 50\text{W}$ 。

安装质量检测单元：采用红外测温仪检测接线端子温度（正常温度 $\leq 60^\circ\text{C}$ ），通过标准信号源校准电压电流采集精度（误差需 $\leq 0.5\%$ ），并测试设备通讯信号强度（LORA 无线通讯距离需 $\geq 500\text{m}$ ）。对检测发现的虚接（端子温度超 80°C ）、通讯中断等问题，生成安装质量报告并督促整改，整改合格率需达 100% 方可进入下一环节。

3.3 数据采集传输模块

数据采集传输模块实现“多源数据采集—边缘处理—加密传输”的全流程管理，解决传统云端处理延迟高、数据安全差的问题，包含三个单元：

多源数据采集单元：通过主机采集台区变压器运行数据（总负荷、三相不平衡度），从机采集用户电采暖设备负荷、电量及三相用电数据，边缘代理终端汇总两类数据。支持有线（以太网）与 LORA 无线双模式采集，当有线通讯中断时，自动切换至无线模式，

保障数据采集连续性。

边缘计算单元：在边缘代理终端内置负荷预测与调控决策算法，实时分析采集数据（如判断台区负荷是否超出安全阈值），就地生成初步调控指令（如下调某片区 10% 的电采暖负荷）。边缘处理延迟 $\leq 100\text{ms}$ ，远低于云端处理延迟（通常 $\geq 1\text{s}$ ），满足实时调控需求。

加密传输单元：采用 AES-256 加密算法对采集数据与调控指令进行加密处理，通过预留的 4G/5G 接口与柔性负荷调控平台实现远程传输。传输过程中采用 CRC32 校验算法验证数据完整性，防止数据篡改或泄露，数据传输成功率需 $\geq 99.9\%$ 。

4 用于供电的柔性负荷调控系统运行流程

4.1 前期准备阶段

组织协调模块明确项目组（含技术组、施工组、运维组）人员职责，制定施工方案与安全保障方案。材料工具管理模块筹备主机、从机、电缆、绝缘工具等物资，建立台账并检查完好性，确保施工物资到位率 100%。

4.2 台区摸排与设备安装阶段

设备摸排模块完成“初筛—采集—核验”流程，确认实施台区并生成摸排报告；调控设备安装模块按“主机—从机”顺序完成安装，安装质量检测单元验收合格后，移交数据采集传输模块。

4.3 系统配置与调试阶段

配置管理模块建立台区档案（关联主机与从机 ID），预设 3-5 种调控策略（如高峰应急调控、日常优化调控）。

数据采集传输模块调试通讯模式与加密算法，确

保数据采集与传输正常，边缘计算单元能生成有效调控指令。

4.4 负荷调控与效果评估阶段

负荷调控执行模块根据实时数据开展分层调控，安全防护模块同步监测风险。

调控效果评估模块定期（每月）对比调控前后台区重过载天数、负荷峰值及用户接受度，生成评估报告。

基于评估结果，配置管理模块更新系统参数，负荷调控执行模块优化调控策略，形成闭环优化。

5 结语

用于供电的柔性负荷调控系统显著提升柔性负荷调控的效率与精准度。通过电采暖设备摸排模块的智能核验与数据采集传输模块的边缘计算，实现台区筛选、数据采集与调控响应的高效化，避免人工误差与延迟；负荷调控执行模块的分层调控策略，兼顾电网安全与用户差异，提升调控精准度，同时调控效果评估模块形成的闭环优化机制，持续提升系统适配性，有效缓解冬季电网负荷高峰压力，减少传统调控手段的盲目性与低效性。

用于供电的柔性负荷调控系统强化系统运行安全性与用户体验。安全防护模块的全流程风险预警与应急处置，大幅降低施工与设备运行隐患，保障人员安全与电网稳定；加密传输单元确保数据安全，维护电网数据隐私；分户精准调控避免“一刀切”对用户采暖的影响，提升用户接受度；远程监控调度与组织协调模块则优化项目管理与运维效率，减少资源浪费，推动柔性负荷调控从“被动应对”向“主动精准”转变，为电网冬季稳定运行与用户舒适采暖提供双重保障。

参考文献：

- [1] 席昌远,吴迪,李桂强,等.计及需求侧柔性负荷调控的综合能源系统优化运行方法研究[J].暖通空调,2024,54(08):81-89.
- [2] 犹锋,张华鲁,石杰,等.基于云边协同技术的柔性负荷聚合调控系统设计[J].供用电,2021,38(12):64-73.
- [3] 张华鲁,严干贵,石杰,等.蓄热式电采暖柔性负荷特性建模及可调潜力研究[J].高电压技术,2022,48(06):2108-2116.
- [4] 李显奇.分布式柔性负荷参与电网调控策略研究[D].沈阳工程学院,2021.